

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ УСРЕДНЯЮЩИХ БУНКЕРОВ КОНВЕЙЕРНОГО ТРАНСПОРТА УГОЛЬНЫХ ШАХТ

*Р.В. Кирия, В.Ф. Монастырский, Д.Д. Брагинец, Т.Ф. Мищенко,  
Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины*

Рассмотрен вопрос имитационного моделирования процессов происходящих в усредняющих бункерах поземных конвейерных линий угольных шахт. Разработаны алгоритмы имитационного моделирования усредняющих бункеров для различных режимов их работы. С помощью разработанных имитационных моделей определены средний объем и среднее квадратичное отклонение груза в бункере для различных режимов их работы. Проведен анализ результатов имитационного моделирования, а так же сравнение их с корреляционной теорией.

**Введение.** Усредняющие бункеры получили широкое распространение в системах подземного конвейерного транспорта угольных шахт. Они предназначены для уменьшения неравномерности грузопотоков поступающих на конвейер, имеют небольшую вместимость (20-40 м<sup>3</sup>) и обычно оборудуются в участковых выработках при перегрузке забойных грузопотоков на сборный конвейер.

В настоящее время низкая эффективность работы усредняющих бункеров в условиях угольных шахт обусловлена низким уровнем их автоматизации и неоптимальными режимами функционирования.

Одним из путей повышения эффективности работы усредняющих бункеров является применение компьютеров (контроллеров) позволяющих оптимизировать процесс их функционирования.

Для этого необходимо уметь моделировать процессы функционирования усредняющих бункеров в разных режимах их работы.

**Целью работы** является повышение эффективности функционирования усредняющих бункеров подземных конвейерных линий угольных шахт путем оптимизации режимов их работы.

### **Задачи:**

- разработать алгоритмы функционирования усредняющих бункеров в различных режимах их работы;
- определить математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение объема груза в усредняющем бункере в зависимости от времени при различных режимах работы бункеров;
- провести анализ полученных результатов моделирования и сравнить их с корреляционной теорией.

На основании изучения работы бункеров в системах подземного конвейерного транспорта угольных шахт были выделены четыре режима их работы.

Для первого режима работы загрузка и разгрузка бункера происходит постоянно. Этот режим характерен при работе бункера в качестве перегрузки при небольшой высоте падения груза. В этом случае отсутствует необходимость поддержания в бункере защитного слоя груза.

Для второго режима работы бункера при достижении максимального уровня груза в бункере загрузка выключается при этом разгрузка работает постоянно. Такой режим возникает если производительность подбункерной конвейерной линии меньше производительности надбункерной линии, на реальных шахтах такой режим работы бункеров встречается редко.

При третьем режиме загрузка бункера работает постоянно, разгрузка выключается при достижении грузом минимального уровня груза в бункере. Этот режим характерен для работы усредняющих бункеров в случае необходимости поддержания в них защитного слоя груза. В настоящее время на многих шахтах бункеры часто работают в таком режиме. При этом из-за отсутствия эффективных средств управления функции управления разгрузкой бункера вынужден выполнять человек, непосредственно находящийся возле бункера и не всегда имеющий возможность определить объем груза в бункере.

При четвертом режиме работы загрузка выключается при достижении грузом максимального уровня груза в бункере и разгрузка выключается при достижении грузом минимального уровня груза в бункере. Этот режим характерен для работы дозирующих бункеров.

При математическом моделировании случайных процессов, происходящих в бункерах, возникают большие математические трудности, связанные с решением сложных уравнений в частных производных.

Одним из методов исследования случайных процессов в этих случаях является метод имитационного моделирования.

С другой стороны, математические модели случайных процессов происходящих в бункерах работающих в системах подземного конвейерного транспорта угольных шахт практически невозможно проверить на адекватность, так как провести опытные и экспериментальные исследования функционирования бункеров на производстве или в лабораторных условиях крайне сложно. Поэтому имитационное моделирование в этом случае служит первым этапом при исследовании процессов происходящих в бункерах.

Согласно [1] поступающий в бункер грузопоток  $Q(t)$  описывается непрерывным марковским нормальным случайным процессом с математическим ожиданием  $m_Q$  (т/мин), средним квадратичным отклонением  $\sigma_Q$  (т/мин), и корреляционной функцией, определяемой по формуле

$$R_Q(\tau) = \sigma_Q^2 e^{-\alpha\tau}.$$

где  $\alpha$  – параметр корреляционной функции (1/мин)

Представим поступающий в бункер грузопоток в виде ступенчатой случайной функции со столбцами, имеющими одинаковое основание  $\Delta t$ , и с разной высотой имеющей случайное значение  $\xi_k$  (т/мин) (см. рис. 1).

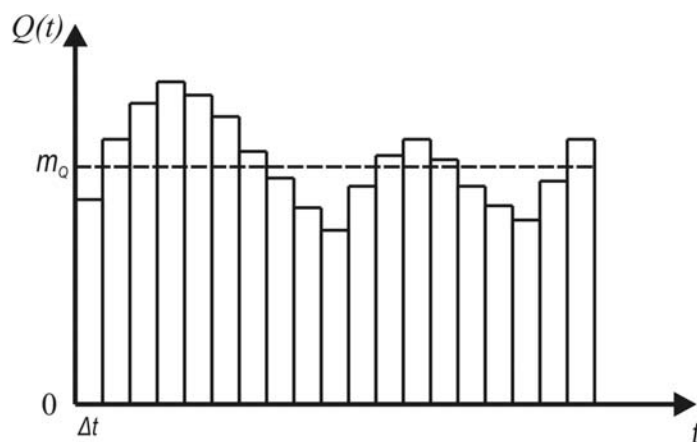


Рис. 1. График грузопотока, поступающего в усредняющий бункер

Тогда на каждом шаге имитации величина порции поступающего в бункер груза за интервалы времени  $[t_k, t_k + \Delta t]$  ( $t_k = k\Delta t$ ) определяются по формуле

$$\xi_k = (m_Q + \eta_k) \Delta t \quad (k=1, 2, \dots, n). \quad (1)$$

где

$\Delta t = T/n$  – шаг имитации (мин);

$T$  – время работы бункера (мин);

$n$  – количество точек имитации процесса;

$\eta_k$  – значение случайной функции  $\eta(t)$  в момент времени  $t_k = k\Delta t$ , (т/мин).

Здесь  $\eta(t)$  является случайной функцией стационарного нормального марковского процесса с математическим ожиданием  $M[\eta(t)]=0$  [2].

При этом,  $\eta_k$  определяется из рекуррентного соотношения [3]

$$\eta_{k+1} = e^{-\alpha \Delta t} \eta_k + \sigma_Q \sqrt{1 - e^{-2\alpha \Delta t}} v_{k+1} \quad (k=1, 2, \dots, n), \quad (2)$$

где

при  $k=1$ ,  $\eta_1 = \sigma_Q v_1$ ;

$v_i$  – независимые, нормально распределенные величины с нулевым средним и единичной дисперсией, т.е.  $M[v_k]=0$ ,  $D[v_k]=1$ , которые определяются по формуле

$$v_k = \sum_{i=1}^{12} r_i - 6,$$

где  $r_i$  – независимые, равномерно распределенные в интервале  $(0,1)$  величины, определяемые с помощью датчика случайных чисел.

Обозначим через  $Q_n$  минутную производительность разгружаемого из бункера грузопотока, которая не изменяется по времени; а через  $V(t)$  обозначим объем груза, находящегося в момент времени  $t$  в бункере.

Тогда алгоритмы имитации случайных процессов для каждого из четырех выше указанных режимов функционирования усредняющих бункеров имеют вид

1) Надбункерный и подбункерный конвейеры работают постоянно. В этом случае текущее значение объема груза в бункере  $V(t)$  в момент времени  $t_k=k\Delta t$  имитируется согласно алгоритму

если  $V_k \geq 0$ , то  $V_{k+1} = V_k + \frac{1}{\gamma} (\xi_{k+1} - Q_n \Delta t)$ ,  $(k=0, 1, 2, \dots, n)$ ;

если  $V_k < 0$ , то  $V_k = 0$ .  $(V_0=0)$

где  $\gamma$  – объемный вес груза (т/м<sup>3</sup>).

2) Надбункерный конвейер останавливается, если объем груза в бункере достигает предельного максимального значения  $V_2$ , при этом подбункерный конвейер работает постоянно. В этом случае текущее значение объема груза в бункере  $V(t)$  в момент времени  $t_k$  имитируется согласно алгоритму

если  $0 \leq V_k \leq V_2$ , то  $V_{k+1} = V_k + \frac{1}{\gamma} (\xi_{k+1} - Q_n \Delta t)$ ,  $(k=0, 1, 2, \dots, n)$ ;

если  $V_k > V_2$ , то  $V_{k+1} = V_k - \frac{1}{\gamma} Q_n \Delta t$ ;

если  $V_k < 0$ , то  $V_k = 0$  и  $V_{k+1} = V_k + \frac{1}{\gamma} (\xi_{k+1} - Q_n \Delta t)$ .

3) Надбункерный конвейер работает постоянно, а при достижении объема груза в бункере предельного максимального значения  $V_2$  включается подбункерный конвейер. Если объем груза в бункере становится меньше минимального значения  $V_1$ , то подбункерный конвейер останавливается. В этом случае текущее значение объема груза в бункере  $V(t)$  в момент времени  $t_k$  имитируется согласно алгоритму

если  $V_1 \leq V_k \leq V_2$ , то  $V_{k+1} = V_k + \frac{1}{\gamma} \xi_{k+1}$ ,  $(k=0, 1, 2, \dots, n)$ ;

если  $V_k > V_2$ , то  $V_{k+1} = V_k + \frac{1}{\gamma} (\xi_{k+1} - Q_n \Delta t)$ ;

если  $V_k < V_1$ , то  $V_{k+1} = V_k + \frac{1}{\gamma} \xi_{k+1}$ .

4) Надбункерный конвейер останавливается, если объем груза в бункере достигает предельного максимального значения  $V_2$ , а подбункерный конвейер останавливается, если объем груза в бункере достигает предельного минимального значения  $V_1$ . В этом случае текущее значение объема груза в бункере  $V(t)$  в момент времени  $t_k$  определяется согласно алгоритму

если  $V_1 \leq V_k \leq V_2$ , то  $V_{k+1} = V_k + \frac{1}{\gamma} (\xi_{k+1} - Q_n \Delta t)$ ,  $(k=0,1,2,\dots,n)$ ;

если  $V_k > V_2$ , то  $V_{k+1} = V_k - Q_n \Delta t$ ;

если  $V_k < V_1$ , то  $V_{k+1} = V_k + \frac{1}{\gamma} \xi_{k+1}$ ;

если  $V_k < V_1$  и  $V_k < 0$ , то  $V_k = 0$  и  $V_{k+1} = V_k + \frac{1}{\gamma} \xi_{k+1}$ .

Для каждого случая проводилось  $N$  имитаций реализаций случайного процесса  $V(t)$ . Затем, согласно методам математической статистики [4], для каждого момента времени  $t_k$  находились: математическое ожидание  $M[V(t)]$ , дисперсия  $D[V(t)]$  и среднее квадратичное отклонение  $\sigma_V$  объема груза в бункере.

На основании разработанных алгоритмов было проведено имитационное моделирование данных режимов работы усредняющих бункеров при различных значениях загружаемого  $m_Q$  и разгружаемого  $Q_n$  грузопотоков, позволившее определить математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение объема груза в бункере  $V(t)$ .

Моделирование проводилось при следующих данных: среднее значение поступающего грузопотока  $m_Q = 3,7$  т/мин или 2000 т/сут; значения разгружаемого грузопотока  $Q_n = 2; 3,7$  и 5 т/мин соответственно; коэффициент неравномерности  $K_n = 2$ ; параметр корреляционной функции  $\alpha = 0,14$  1/мин; время моделирования  $T = 1000$  мин; шаг времени моделирования  $\Delta t = 1$  мин; верхний предел груза  $V_2 = 40$  м<sup>3</sup>; нижний предел груза  $V_1 = 3$  м<sup>3</sup>; объемный вес груза  $\gamma = 1$  т/м<sup>3</sup>; число имитаций  $N = 1000$ .

На рисунках 2-5 показаны результаты имитационного моделирования математического ожидания  $M[V]$ , и среднего квадратичного отклонения  $\sigma_V$  объема груза в усредняющем бункере в зависимости от времени. На всех рисунках позиция "а" соответствует значению  $Q_n = 2$  т/мин, позиция "б" соответствует значению  $Q_n = 3,7$  т/мин, позиция "в" соответствует значению  $Q_n = 5$  т/мин.

На рисунке 2 точками показаны значения математического ожидания  $M[V]$  и среднего квадратичного отклонения  $\sigma_V$  объема груза при первом режиме работы усредняющего бункера, вычисленные согласно корреляционной теории [2].

При этом согласно работе [5] математическое ожидание, дисперсия, и среднее квадратичное отклонение объема груза в бункере определялись по формулам

$$M[V(t)] = (m_Q - Q_n)t \quad (3)$$

$$D[V(t)] = 2\sigma_Q^2 \left( \frac{1}{\alpha^2} e^{-\alpha t} + \frac{t}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2} \right), \quad (4)$$

$$\sigma_V = \sigma_Q \sqrt{2 \left( \frac{1}{\alpha^2} e^{-\alpha t} + \frac{t}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2} \right)}. \quad (5)$$

где  $\sigma_Q = \frac{1}{3} m_Q (K_i - 1)$ ;  $K_i$  – коэффициент неравномерности поступающего в бункер грузопотока.

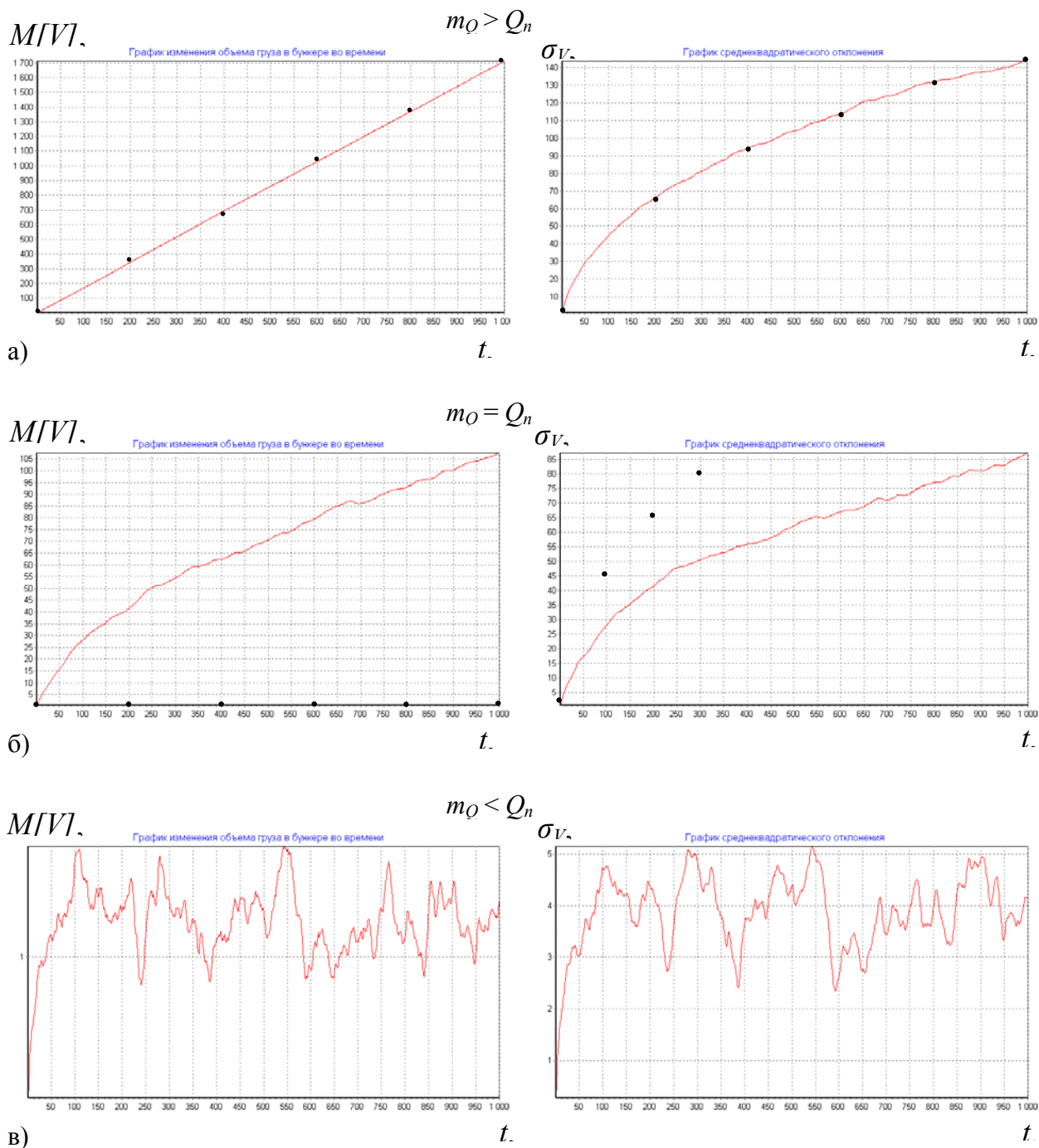


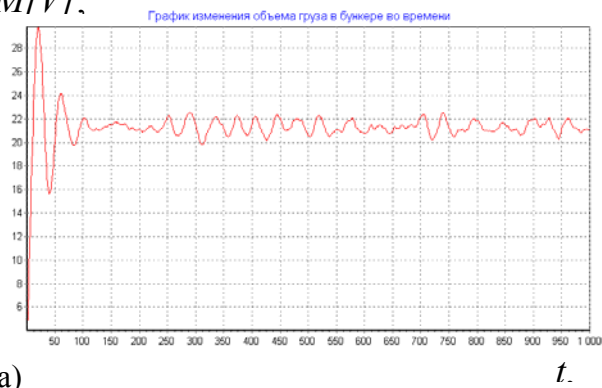
Рис. 2. Результаты имитационного моделирования первого режима работы усредняющего бункера

Из графиков видно (рис. 2 а), что для первого режима работы усредняющего бункера при  $m_Q > Q_n$  результаты имитационного моделирования хорошо совпадают с результатами математического моделирования согласно корреляционной теории. Однако при  $m_Q \leq Q_n$  результаты имитационного моделирования существенно отличаются от корреляционной теории (рис. 2 б, в). Это связано с тем, что для всех рассмотренных режимов работы бункера при  $m_Q \leq Q_n$  случайный процесс описывающий количество груза в бункере отличается от нормального марковского процесса.

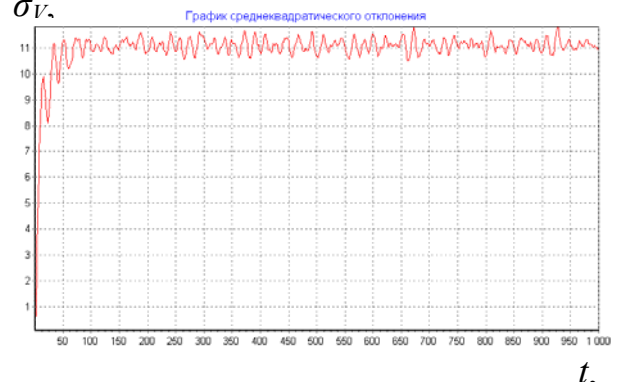
Из анализа графиков рассмотренных режимов работы усредняющего бункера следует что для первого режима (рис. 2) в случае  $m_Q \geq Q_n$  с увеличением времени  $t$  среднее количество груза в бункере постоянно увеличивается, а при  $m_Q < Q_n$  среднее количество груза в бункере колеблется около постоянного значения которое уменьшается с увеличении  $Q_n$ .

$$m_Q > Q_n$$

$M[V]$ ,

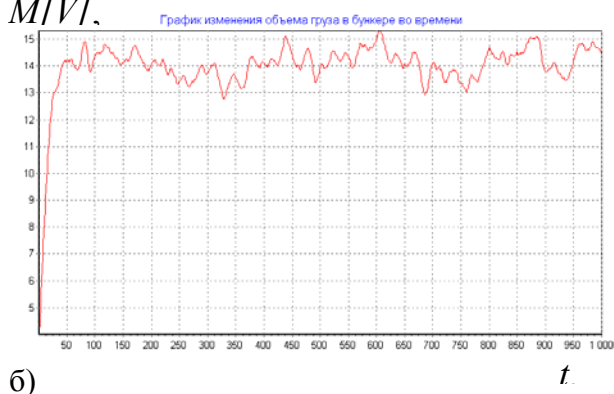


$\sigma_V$ ,

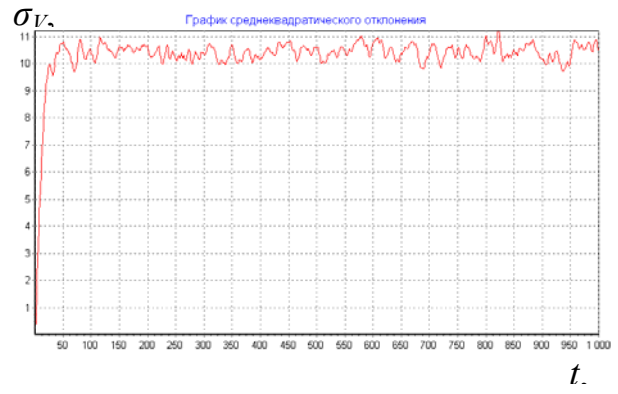


$$m_Q = Q_n$$

$M[V]$ ,

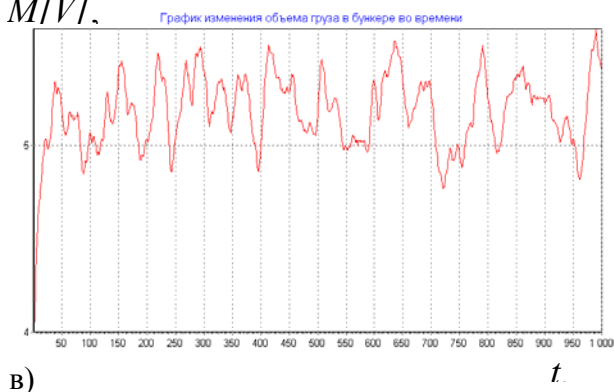


$\sigma_V$ ,



$$m_Q < Q_n$$

$M[V]$ ,



$\sigma_V$ ,

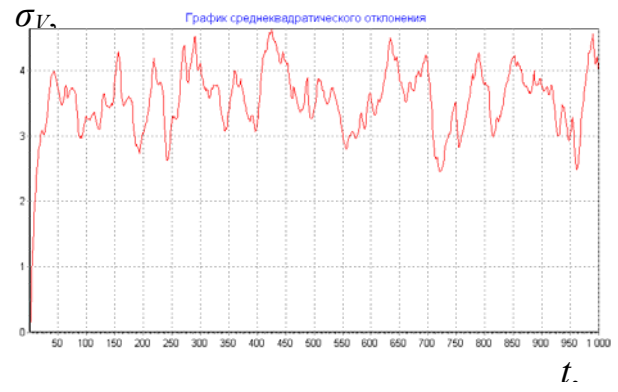
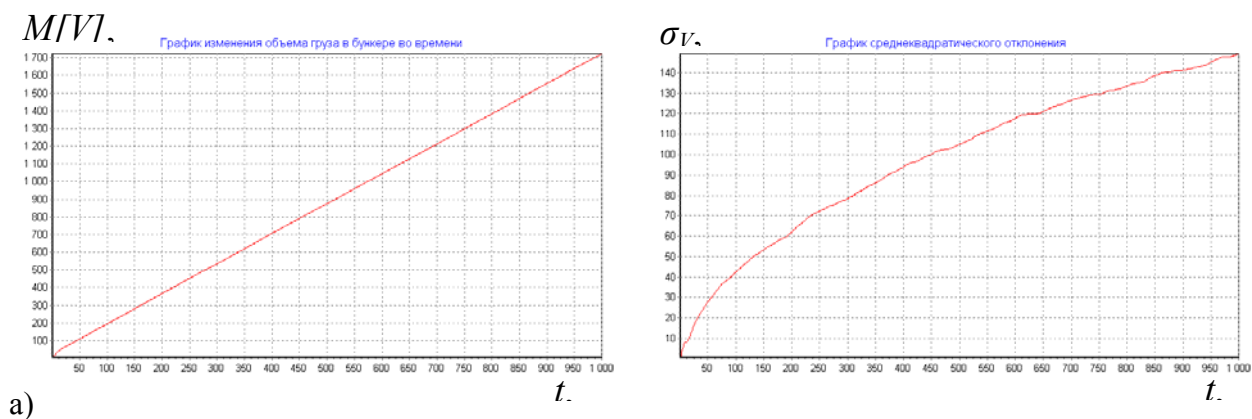


Рис. 3. Результаты имитационного моделирования второго режима работы усредняющего бункера

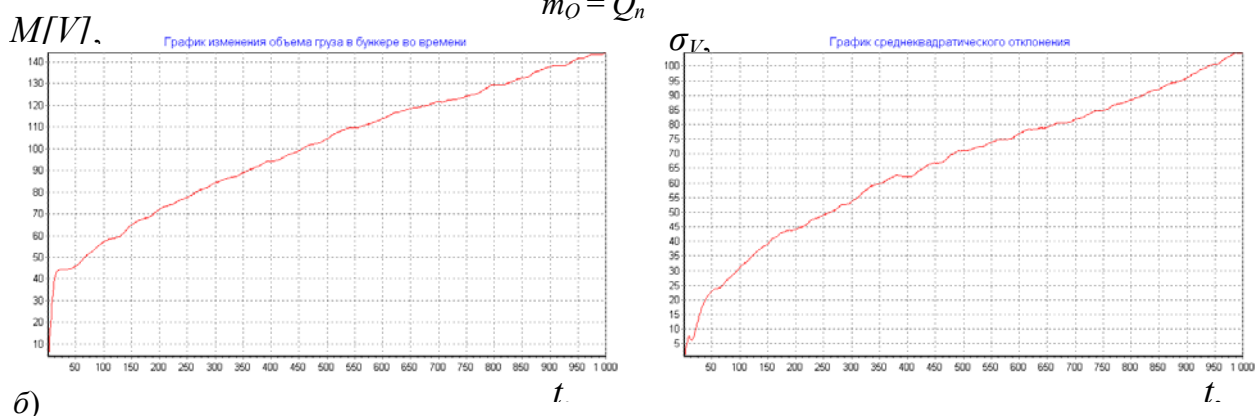
Во втором режиме (рис. 3) при любых значениях  $m_Q$  и  $Q_n$  среднее количество груза в бункере колеблется около некоторого постоянного значения которое уменьшается с увеличением  $Q_n$ .

В третьем режиме (рис. 4), так же как и в первом, в случае  $m_Q \geq Q_n$  с увеличением времени  $t$  среднее количество груза в бункере постоянно увеличивается, а при  $m_Q < Q_n$  среднее количество груза в бункере колеблется около постоянного значения которое уменьшается с увеличением  $Q_n$ .

$$m_Q > Q_n$$



$$m_Q = Q_n$$



$$m_Q < Q_n$$

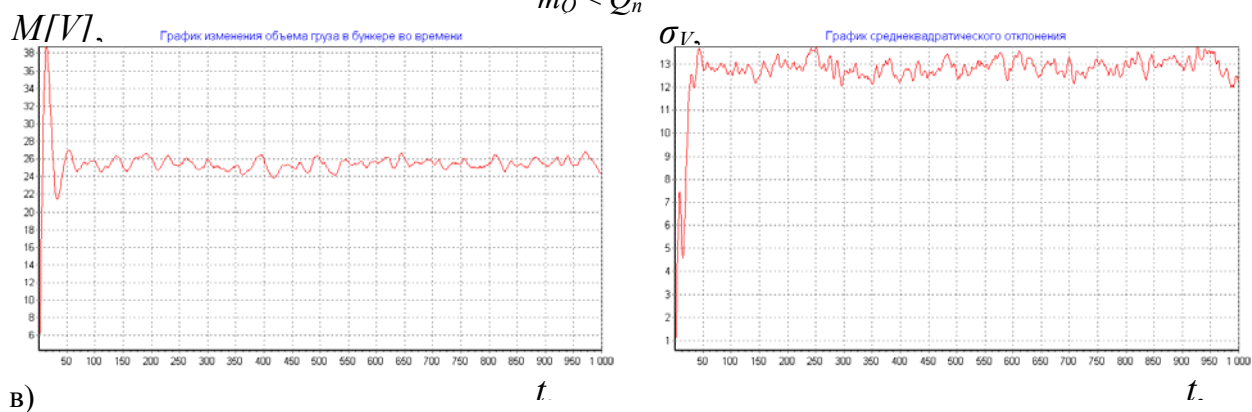


Рис. 4. Результаты имитационного моделирования третьего режима работы усредняющего бункера

В четвертом режиме (рис. 5), так же как и во втором, при любых значениях  $m_Q$  и  $Q_n$  среднее количество груза в бункере колеблется около некоторого постоянного значения которое уменьшается с увеличением  $Q_n$ . При этом время выхода среднего количества груза в бункере на стационарное значение заметно увеличивается по сравнению со вторым режимом.

Третий режим работы усредняющего бункера в случае при  $m_Q > Q_n$  не эффективен, так как ведет к частому переполнению бункера, а при  $m_Q < Q_n$  эффективен, так как объем груза в бункере наиболее быстро достигает среднего стационарного значения и обеспечивает поддержание минимального объема груза в бункере предотвращающего прямое падение кусков груза на питатель или ленту конвейера.



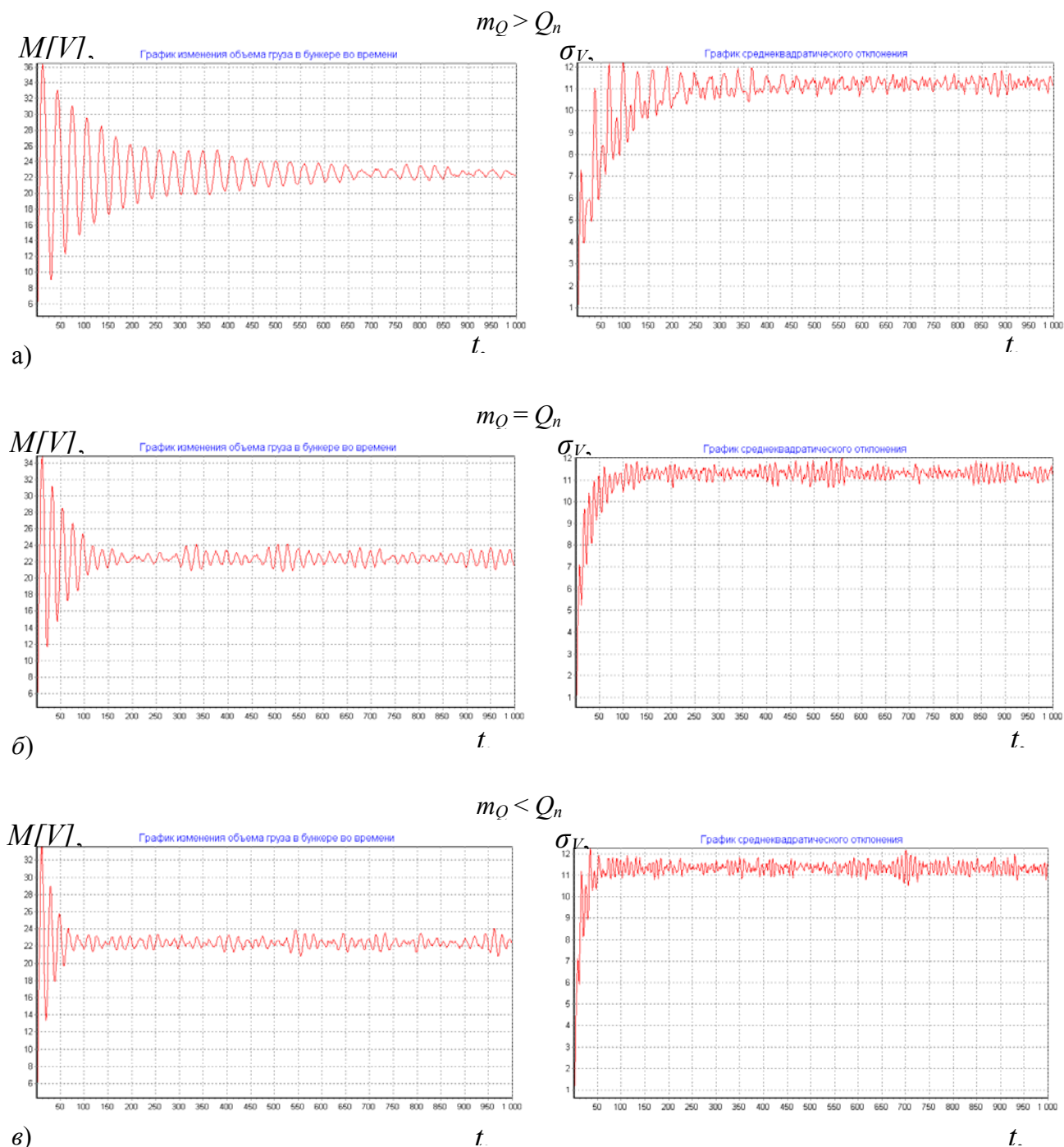


Рис. 5. Результаты имитационного моделирования четвертого режима работы усредняющего бункера

Для четвертого режима работы усредняющего бункера объем груза в бункере колеблется возле постоянного значения, причем с увеличением  $Q_n$  уменьшается время достижения стационарного состояния. Однако этот режим мало эффективен из-за наложения ограничений на поступающий грузопоток.

#### Выводы:

- Разработаны алгоритмы имитационного моделирования для различных режимов работы усредняющих бункеров, позволяющие исследовать процессы функционирования бункеров в системах подземного конвейерного транспорта угольных шахт, а также определить их харак-



теристики, в частности математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение объемов груза.

- Анализ результатов имитационного моделирования первого режима работы бункеров показал, что если средняя производительность грузопотока, поступающего в усредняющий бункер больше средней производительности разгружаемого грузопотока ( $m_Q > Q_n$ ), то объем груза в бункере можно описать нормальным случайным нестационарным процессом с математическим ожиданием и дисперсией, вычисленными по формулам (3), (4). При этом если средняя производительность поступающего в бункер грузопотока близка или меньше производительности разгружаемого грузопотока ( $m_Q \leq Q_n$ ), то результаты имитационной модели функционирования бункера существенно отличаются от результатов корреляционной теории.

- Анализ первого и третьего режимов работы усредняющих бункеров показал, что при  $m_Q > Q_n$  математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение с течением времени постоянно возрастает, что часто приводит к переполнению бункеров. При  $m_Q \leq Q_n$  для первого и третьего режимов функционирования бункеров математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение сначала возрастает, а затем колеблется около определенного значения, которое уменьшается с увеличением  $Q_n$ .

- Анализ второго и четвертого режимов работы усредняющих бункеров показал, что при любых  $m_Q$  и  $Q_n$  математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение с начала возрастают, а затем колеблется около определенного значения, которое уменьшается с увеличением  $Q_n$ . При этом для четвертого режима работы время выхода среднего объема груза в бункере на стационарное значение больше чем для второго режима.

#### Список литературы

1. Шахмейстер Л.Г. Подземные конвейерные установки / Л.Г. Шахмейстер, Г.И. Солод. - М.: Недра, 1976. - 432 с.
2. Свешников А.А. Прикладные методы случайных функций. - М.: Наука, 1968. - 464 с.
3. Полляк Ю.Г. Вероятностное моделирование на ЭВМ. - М.: Советское радио, 1971 - 222 с.
4. Потапов В.Д. Имитационное моделирование производственных процессов в горной промышленности / В.Д. Потапов, А.Д. Яризов. - М.: Высшая школа, 1981. - 189 с.
5. Кирия Р.В. Определение минимального объема сглаживающего бункера / Р.В. Кирия, Д.Д. Брагинец // Збірник наук. праць НГУ. - Дніпропетровськ: РВК НГУ. - 2007. - №27. - С. 88-93.